

CONTROLE INTEGRADO DO PERFIL DE TENSÃO E DISTORÇÕES HARMÔNICAS VIA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E LÓGICA FUZZY

ANGELO M. F. DE ALMEIDA^{*}; FRANKLIM M.P.PAMPLONA; ANDREA A. SOUSA^{*};
HELON D. M. BRAZ

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão - SE*

** E-mails: {angelo, andreas}@del.ufs.br*

*Coordenadoria de Engenharia Elétrica – Campus João Pessoa,
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa – PB*

E-mail: franklinpamplona@ifpb.edu.br

Diretoria de Engenharia, Companhia Hidrelétrica de São Francisco, Recife - PE

E-mail: helond@chesf.gov.br

Abstract— The location of voltage regulators and harmonic filters is adopted here to integrated control of voltage and harmonic distortion (volt/dht) on radial distribution feeder. The problem is formulated as a multiobjective optimization problem to be solved through of SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) improved using fuzzy logic, techniques of recognized computational efficiency. The expert knowledge is taken into account via fuzzy logic in order to reduce the search space using voltage regulators in standard units. Two objectives have been established: voltage level deviation and total harmonic distortion. The algorithm is applied known 34-bus feeder, with application of linear and nonlinear load variations.

Keywords— Multiobjective Optimization, Fuzzy Logic, Distribution Systems, Voltage Regulator, Harmonic Filter.

Resumo— A alocação de reguladores de tensão e filtros harmônicos passivos é aqui adotada para controle integrado de tensão e distorção harmônica em alimentadores radiais de distribuição. O problema é formulado como sendo de otimização combinatória a ser resolvido pelo algoritmo multiobjetivo SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) e incrementado por lógica fuzzy, pois estas técnicas têm eficiência computacional reconhecida. O conhecimento especialista do problema é aplicado, via lógica fuzzy, na redução do espaço de busca e dimensionamento dos reguladores de tensão em unidades padronizadas. Os dois objetivos considerados são: desvio do nível de tensão nas barras e distorção harmônica total. O algoritmo proposto é aplicado a um conhecido sistema radial de 34 barras, com a utilização de cargas lineares e não lineares.

Palavras-chave— Otimização Multiobjetivo, Lógica Fuzzy, Sistemas de Distribuição, Regulador de Tensão, Filtro Harmônico.

1 Introdução

O crescimento dos sistemas elétricos, o aumento na exigência dos consumidores e no rigor da legislação que rege o setor elétrico, têm tornado indispensável o controle das variáveis relacionadas a qualidade da energia elétrica. Também se constata aumentos significativos de correntes harmônicas porque as cargas são fortemente indutivas e possuem características não lineares, que injetam correntes harmônicas de diversas ordens. Assim, torna-se interessante considerar o crescimento do índice de distorção harmônica total de tensão.

Os denominados MOGA's (*Multiobjective Genetic Algorithm*) têm sido utilizados com êxito para resolver problemas nos sistemas de potência, sendo o SPEA2 e NSGA-II os mais utilizados. Estes métodos são adequados para resolver problemas de otimização combinatória cujo espaço de busca é de variáveis discretas, como é o caso de alocação de equipamentos e sua programação de operação.

Milošević & Begović (2004), por exemplo, aplicaram um MOGA para a alocação de capacitores, considerando o ajuste do perfil de tensão e a minimização das perdas e custos. Em Souza & Almeida (2010), foi feita a alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão, onde se utilizou um algoritmo multiobjetivo SPEA2. Este tem a vantagem de se poder tratar cada objetivo de forma independente e sem necessitar de ajustes de pesos para cada objetivo considerado.

A lógica fuzzy tem sido muito aplicada em diversas áreas do conhecimento para resolver problemas de controle, classificação, modelagem e tem sido bastante aplicada nos estudos de controle do perfil de tensão em sistemas de distribuição, como se observa em: Liang & Wang (2003) e Miranda et al, (2007).

Para a redução dos distúrbios harmônicos, um dos métodos mais empregados é a instalação de filtros para bloquear ou captar as correntes harmônicas.

Os filtros passivos de sintonia simples são os mais utilizados pelas concessionárias por serem os mais simples e de menor custo, além de também atuarem no suprimento de potência reativa.

Para a sintonia dos filtros, costuma-se levar em conta que a maioria das distorções encontradas nos sistemas primários e secundários de distribuição deve-se a harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens e, em menor grau a harmônicas de 9ª, 11ª e 13ª ordens, como mostram diversos estudos (Tostes et al, 2001).

Levando-se em conta que a alocação de reguladores de tensão e filtros harmônicos num alimentador pode ser considerada como uma variável discreta, devido a viabilidade da instalação apenas nas barras do alimentador, pode-se abordar tal problema como um típico problema de otimização combinatória (Tien-Ting Chang & Hong-Chan Chang, 1998) e (Pamplona & Souza, 2003).

2 Métodos de Solução

2.1 Otimização Multiobjetivo

O problema de otimização multiobjetivo é definido como (Souza & Almeida, 2010):

Otimizar

$$z = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_r(x)) \quad (1)$$

sujeito a

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_p(x)) \leq b \quad (2)$$

em que

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$, é o *vetor decisão* e X o *espaço decisão*;

$z = (z_1, z_2, \dots, z_r) \in Z$, é o *vetor objetivo* e Z o *espaço objetivo*;

$g(x) \leq b$, $b \in \mathbb{R}^p$ são as restrições estabelecidas para que se tenham somente soluções factíveis no espaço de busca e desta forma se trabalhará com o *espaço de decisão factível* definido por: $X^* = \{x \in X : g(x) \leq b\}$. Um vetor $a \in X$ *domina* um vetor $b \in X$ (também escrito como $a \prec b$), se e somente se:

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, \dots, n\}, f_i(a) &\leq f_i(b) \wedge \\ \exists j \in \{1, \dots, n\}: f_j(a) &< f_j(b) \end{aligned} \quad (3)$$

Em outras palavras, uma solução domina outra quando ela é menor ou igual (assumindo um problema de minimização) com respeito a todos os seus objetivos, e é estritamente menor com respeito a pelo menos um deles.

2.2 O Algoritmo SPEA2

O SPEA2 (Zitzler et al, 2002) usa uma população normal P_t de tamanho N e uma população externa

\bar{P}_t de tamanho \bar{N} , também chamada de *arquivo*, onde são guardadas as soluções não dominadas.

O algoritmo começa criando uma população aleatória P_0 e uma população externa \bar{P}_t inicialmente vazia. O valor de aptidão para as soluções de $Q = P_t \cup \bar{P}_t$ é obtido em várias etapas. Primeiro, um valor de aptidão $S(i)$ (*strenght fitness*) é encontrado usando:

$$S(i) = |\{j, j \in Q, \wedge i \prec j\}| \quad (4)$$

O valor $S(i)$ é o número de soluções que i domina em Q . Depois, calcula-se o valor $R(i)$ (*raw fitness*), conforme a equação:

$$R(i) = \sum_{j \in Q, j \prec i} S(j) \quad (5)$$

Isto significa que $R(i)$ é a soma dos $S(j)$ das soluções j que dominam i em Q , sendo que para as soluções não dominadas tem-se $R(i) = 0$. Soluções com um $R(i)$ alto são dominadas por muitas soluções em Q .

O SPEA2 usa uma informação de densidade, baseada no método de *k-vizinhos*, onde a densidade em qualquer ponto é uma função decrescente em relação ao inverso da distância Euclidiana (no espaço objetivo) ao *k-ésimo* ponto mais próximo.

Para cada solução i em Q , obtêm-se as distâncias aos $|Q| - 1$ indivíduos de Q . Logo, estas distâncias são ordenadas em ordem ascendente. A densidade $D(i)$ é formulada como:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (6)$$

em que σ_i^k denota a distância Euclidiana procurada, sendo $k = \sqrt{N + \bar{N}}$. Finalmente, a aptidão calculada para a solução i é:

$$F(i) = R(i) + D(i) \quad (7)$$

2.3 Lógica Fuzzy

A lógica *fuzzy* é uma técnica que se adapta bem para lidar com as imprecisões nos sistemas de potência e permite uma representação computacional dos conhecimentos heurísticos sobre determinado problema. Basicamente é necessário identificar as principais variáveis que têm influência nas decisões do problema, representadas por meio de funções de pertinência que expressam o grau de compatibilidade com um conhecimento prévio, expresso de forma qualitativa, por variáveis lingüísticas.

As variáveis de entrada sofrem três transformações até formarem um espaço de saída. Primeiro, sofrem o processo de *fuzzyficação* que utiliza funções de pertinência definidas e mapeia cada variável do espaço de entrada, também chamado de antecedente.

Depois, o mapa de regras é consultado, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída, denominado de consequente.

Por último é efetuada a *defuzzificação*, que também utiliza funções de pertinência, para calcular as saídas do sistema. Na Figura 1 é apresentado um esquema simplificado de um sistema *fuzzy*.

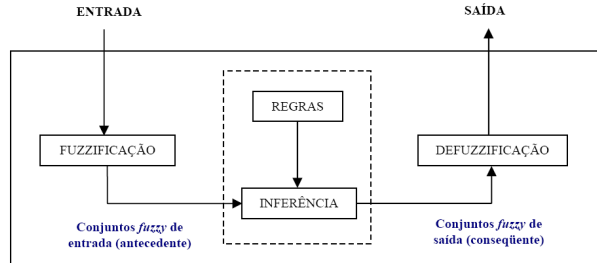


Figura 1 - Esquema simplificado de um sistema *fuzzy*.

3 Formulação do Problema

3.1 A Redução do Espaço de Busca

A redução do espaço de busca feita por lógica *fuzzy* é um processamento realizado antes de dar início ao algoritmo multiobjectivo. A lógica *fuzzy* é aplicada neste trabalho com a finalidade de limitar o espaço de busca para instalação dos reguladores de tensão de modo a se obter um vetor de barras candidatas contendo somente soluções factíveis. Sendo o conhecimento especialista do problema utilizado para estabelecer os critérios que permitem eliminar as barras que representam soluções infactíveis, como as barras terminais, por exemplo.

Este trabalho utiliza no processo de otimização, a potência de reguladores em unidades padronizadas, de acordo com a classe de tensão do alimentador de distribuição (*IEEE Standard C57.15-1999*).

Inicialmente, calcula-se um fluxo de carga (Das et al, 1995) considerando o pior caso que é a condição de carga de pico e sem equipamentos instalados. De posse dos valores de fluxos em todas as barras, calcula-se a potência do regulador, para cada barra, caso fosse ali instalado. A partir daí, definem-se as variáveis de entrada para o sistema *fuzzy*: *tensão de barra* e *potência do regulador*. A variável de saída chamada simplesmente de *índice de saída* é obtida para cada barra e este reflete a possibilidade de se considerar ou não a barra como sendo candidata a participar do processo de otimização para alocação dos reguladores.

As variáveis linguísticas definidas para as funções de pertinência foram: MuB – Muito Baixo, B – Baixo, MB – Médio Baixo, M – Médio, MA – Médio Alto, A – Alto e MuA – Muito Alto.

Uma vez definidas as variáveis de entrada, parte-se para a composição das regras (Tabela 1). Algumas destas, já exprimindo de forma contundente a maneira de se inserir o conhecimento especialista do problema. Por exemplo, se a *tensão na barra* é baixa, então o *índice de saída* é baixo.

Tabela 1 - Resumo das Regras *Fuzzy*.

Vbarra⇒ S-reg ↓	B	MB	M	MA	A
MuB	B	B	B	B	B
B	B	MB	MB	MB	B
MB	B	M	M	MB	B
M	B	A	A	MB	B
MA	B	A	A	MB	B
A	B	MA	MA	MB	B
MuA	B	MA	MA	MB	B

Da mesma forma, para o caso em que a *potência do regulador* é muito baixa, pois poderia ser o caso de uma barra terminal ou alguma próxima desta.

Para a variável *tensão de barra* foi considerado o fato de que não se deve instalar o regulador em barras cuja tensão já esteja abaixo de 0.95 p.u. Pois, segundo a resolução ANEEL N° 505, de 26/11/2001, este é o limite de tensão, abaixo do qual a tensão já é considerada baixa.

Na composição da variável *potência do regulador*, foram utilizados como limites de cada função de pertinência os valores de potência das unidades padronizadas, disponíveis no mercado pelos fabricantes de reguladores de tensão. Para o nível de 13.8 kV, os valores disponíveis são: [69, 138, 207, 276, 414, 500, 552, 667 e 833] kVA, conforme norma *IEEE Standard C57.15-1999*.

A inferência do tipo *máx-min* e o método de *defuzzificação* da *média dos máximos* (M-o-M) são adotados neste trabalho. A variável *índice de saída* expressa a aceitação que uma determinada barra terá para se instalar ou não o regulador de tensão. O gráfico de superfície que mostra as relações das variáveis de entrada e saída é mostrado na Figura 2.

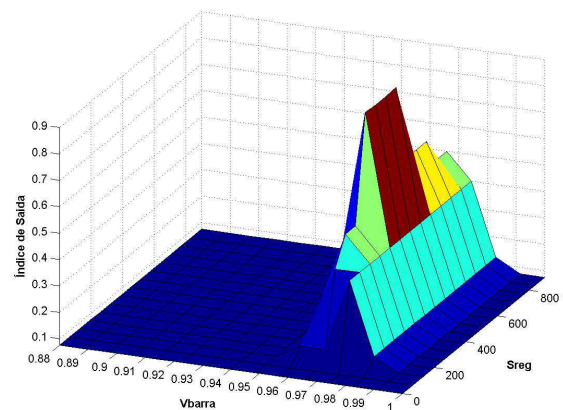


Figura 2 - Gráfico de superfície: resultado da *defuzzificação*.

3.2 A Análise de Harmônicos

A análise do fluxo de harmônicas pode ser realizada empregando o método da injeção de corrente. Neste método, as tensões harmônicas em cada barra são obtidas através da solução das equações de rede formuladas na forma de matriz de admitâncias e de um conjunto de fontes de correntes que representam as características das cargas não lineares nas frequências harmônicas.

A equação que descreve este método é:

$$\mathbf{Y}^h \mathbf{V}^h = \mathbf{I}^h \quad (8)$$

em que:

\mathbf{I}^h é o vetor das correntes harmônicas injetadas nas barras, na frequência harmônica de ordem h ;

\mathbf{V}^h é o vetor das tensões harmônicas a ser calculado;

\mathbf{Y}^h é a matriz admitância da rede.

Na notação adotada, o sobrescrito h assume todos os valores de ordens harmônicas de interesse. O sobrescrito 1 ($h = 1$) corresponde aos parâmetros na frequência fundamental.

Na construção da matriz admitância são empregados modelos dos componentes do sistema cujos parâmetros são dependentes da frequência. As admitâncias de cada trecho do alimentador e de um eventual banco de capacitores instalado no trecho, em cada frequência harmônica, são:

$$y_i^h = \frac{1}{(R_i + jhX_i)} \quad (9)$$

$$y_{C_i}^h = hy_{C_i}^1 \quad (10)$$

sendo,

R_i e X_i a resistência e a reatância indutiva do trecho i do alimentador;

$y_{C_i}^1$ a admitância *shunt* do banco de capacitores na barra i , na frequência fundamental.

As cargas lineares são representadas por uma combinação paralela de resistência e reatância indutiva. Estes parâmetros são obtidos através dos dados da carga na frequência fundamental.

A admitância harmônica destas cargas é, então,

$$y_{L_i}^h = \frac{\bar{P}_i}{V_i^{12}} - j \frac{\bar{Q}_i}{hV_i^{12}} \quad (11)$$

em que \bar{P}_i e \bar{Q}_i são as potências ativa e reativa da carga linear na barra i .

As cargas não lineares são representadas por fontes de correntes harmônicas equivalentes, cujos valores nominais à frequência da rede são:

$$I_i^1 = \left(\frac{\bar{P}_i + j\bar{Q}_i}{V_i^1} \right)^* \quad (12)$$

sendo \bar{P}_i e \bar{Q}_i as potências ativa e reativa da carga não linear na barra i . Nas frequências harmônicas, as fontes de corrente têm valores:

$$I_i^h = c_i^h I_i^1 \quad (13)$$

sendo c_i^h o percentual da corrente harmônica na i -ésima barra, na ordem harmônica h .

Assumindo que a resistência do filtro harmônico é desprezível, a admitância do j -ésimo filtro harmônico, instalado numa barra i , na ordem harmônica h é dada por:

$$y_{F_{j,i}}^h = -j \left[\frac{h(h_{rj}^2 - 1)}{(h^2 - h_{rj}^2)} \right] \frac{Q_{Fj}^1}{V_i^{12}} \quad (14)$$

em que, h_{rj} é o valor absoluto da frequência de sintonia do j -ésimo filtro harmônico instalado na barra i ; Q_{Fj}^1 é a potência reativa fornecida pelo j -ésimo filtro harmônico na frequência fundamental, calculada através da expressão:

$$Q_{Fj}^1 = \left(\frac{h_{rj}^2}{(h_{rj}^2 - 1)} \right) k_j Q_C \quad (15)$$

sendo, k_j o número de módulos capacitivos do j -ésimo filtro, e Q_C a capacidade nominal dos módulos capacitivos disponíveis para instalação.

3.3 Codificação dos Parâmetros do Problema

Na Figura 3 é apresentado o primeiro segmento do cromossomo (em codificação binária), referente a alocação de um banco de reguladores de tensão. A primeira parte informa a barra onde será instalado o regulador. O número de bits desta parte depende de quantas barras estão presentes no vetor de barras candidatas (V_{bc}).

Barra	Ajuste do tap para a carga de:															
	pico				intermediária				leve							
1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1

Figura 3 - Cromossomo na codificação binária.

Por exemplo, para um vetor com dez barras, são necessários quatro bits para se fazer o endereçamento. Os demais bits do cromossomo são para informar o *tap* de operação do regulador em cada patamar. Se for considerado o regulador de 32 degraus (± 16), são cinco bits por patamar de carga e se for 16 degraus (± 16), bastam quatro bits.

Na Figura 4 apresenta-se a estrutura da segunda parte do cromossomo implementado, com a representação de uma solução para a instalação de 3 filtros passivos, onde o primeiro “par-cadeia” de genes informa acerca do 1º filtro passivo, indicando que este será instalado na barra 4 e deverá possuir 11 módulos capacitivos. O segundo par de genes diz respeito ao 2º filtro passivo, indicando que este será instalado na barra 3, contendo 18 módulos capacitivos. Finalmente, o último par de genes informa que o 3º filtro passivo deve ser instalado na barra 6, possuindo 6 módulos capacitivos.

Cromossomo															
↑				↑				↑				↑			
Conteúdo dos genes	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra
	1º Filtro		2º Filtro		3º Filtro										

Figura 4 – Codificação para três filtros harmônicos.

3.4 Funções Objetivo

A função objetivo de reguladores de tensão utiliza uma função de pertinência de lógica *fuzzy* e reflete o critério técnico de minimizar o desvio de tensão nas barras do alimentador, conforme (16), e mostra o desvio médio de tensão das barras do alimentador.

$$f_1(c) = \frac{1}{npat} \sum_{p=1}^{npat} \left(\frac{1}{nb} \sum_{i=1}^{nb} (1 - \mu(v_i)) \right) \quad (16)$$

em que,

$$\mu(v_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } v_i \leq v_{\min} \\ \frac{v_i - v_{\min}}{v_r - v_{\min}} & \text{if } v_{\min} < v_i \leq v_r \\ \frac{v_{\max} - v_i}{v_{\max} - v_r} & \text{if } v_r < v_i \leq v_{\max} \\ 0 & \text{if } v_i \geq v_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

f_1 → função objetivo de reguladores de tensão, a ser minimizada;

c → cromossomo;

$npat$ → número de patamares da curva de duração de carga segmentada;

nb → número de barras do alimentador completo;

μ → função de pertinência triangular;

v_i → tensão da barra i em p.u;

v_{\min}, v_r, v_{\max} → níveis de tensão: mínimo (0.95 p.u), de referência (1.0 p.u) e máximo (1.05 p.u).

No planejamento de filtros, como o propósito é minimizar a distorção harmônica de tensão:

$$f_2 = \max\{DHTv_i\} \quad (18)$$

Sendo,

$$1 \leq i \leq nb$$

f_2 função objetivo de filtros harmônicos, a ser minimizada;

$DHTv_i$, a distorção harmônica total de tensão, na barra i ;

3.5 Formulação para Otimização Multiobjetivo

Apresenta-se a seguir a formulação para o problema de otimização combinatória multiobjetivo com dois objetivos:

$$z = f(x) = (f_1(x), f_2(x)) \quad (19)$$

sujeito a

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x)) \leq b \quad (20)$$

em que

$$x = (x_1, x_2) \in X^*$$

$$z = (z_1, z_2) \in Z^*$$

O vetor decisão x representa uma possível solução para a instalação de capacitores fixos e chaveados. Assim, x_1 representa as variáveis de decisão relacionadas à função objetivo f_1 e x_2 representa as variáveis de decisão relacionadas a função objetivo f_2 . As restrições do problema são:

$$b = (N_{mm}, \Delta_{vp}) \quad (21)$$

$$g_1(x) = N_m$$

$$g_2(x) = \Delta_{vm}$$

em que

N_{mm} número máximo de módulos capacitivos;

Δ_{vp} máximo desvio de tensão de barra permitido;

N_m número de módulos capacitivos para uma dada solução;

Δ_{vm} máximo desvio de tensão de barra ocorrido no alimentador, para uma dada solução.

4 Aplicação

Um alimentador de 34 barras em 11 kV (Cris *et al*, 1997) é utilizado como exemplo da aplicabilidade do método proposto. Considerou-se que as cargas não lineares representam 40% do carregamento do alimentador e possuem o mesmo espectro de corrente, especificado na Tabela 2.

O método é aplicado na alocação e ajustes de um banco de reguladores e no planejamento de dois filtros harmônicos passivos, cujas ordens harmônicas de sintonia são 4,7 e 6,6, respectivamente. Módulos capacitivos de potência igual a 150 kvar, cada um, são considerados

Tabela 2 – Espectro das correntes harmônicas.

Ordem	5	7	11	13	17	19	23	25
Valor %	20,0	14,3	9,1	7,7	5,9	5,3	4,3	4,0

Os parâmetros utilizados para o SPEA2 são apresentados na Tabela 3. O critério de parada foi o limite de 1000 gerações. As restrições do problema bi-objetivo foram: $N_{md} = 30$ e $\Delta_{vm} = 0.05 pu$.

Tabela 3 - Parâmetros do SPEA2.

População	não dominados (arquivo)	Taxas de	
		crossover	Mutação
72	18	60 %	2 %

Após execução do algoritmo multiobjetivo obteve-se uma boa aproximação das soluções com a fronteira de pareto, conforme apresentada na Figura 5. Para uma das soluções não-dominadas traçou-se os perfis de tensão conforme Figura 6.

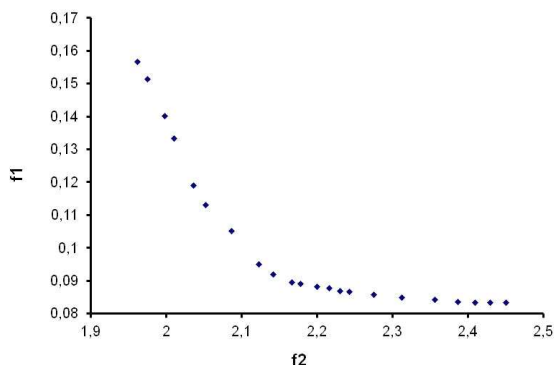


Figura 5 - Soluções não dominadas no espaço objetivo.

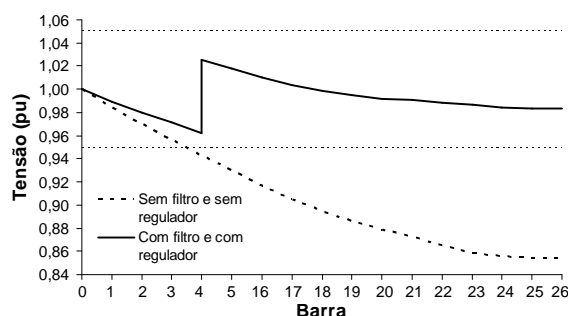


Figura 6 - Perfis de tensão do tronco para carga de pico.

Para esta mesma solução não-dominada, apresenta-se na Tabela 4 um resumo para os casos: sem (caso 1) e com (caso 2) equipamentos instalados.

Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos.

Caso	P_t (kW)	$\text{Max}\{DHT_v\}$ (%)	$\text{Min}\{ V \}$ (p.u.)
1	335,9	6,36	0,8642
2	285,7	2,28	0,9929

5 Conclusão

O problema de minimização da queda de tensão e distorção harmônica total foi tratado aqui como um problema de otimização combinatória e resolvido com um algoritmo genético multiobjetivo (SPEA2) combinado à lógica *fuzzy*. A redução do espaço de busca foi feita com êxito através da análise de sensibilidade das barras. As distorções harmônicas foram reduzidas de forma satisfatória, tendo sido obtido um valor máximo de apenas 1/3 do maior valor encontrado no sistema original.

Também foi constatada uma redução nas perdas de energia do sistema, pois o filtro harmônico também contribui para a compensação reativa.

A codificação apresentada é dinâmica, pois permite que se possa considerar mais bancos de reguladores e filtros harmônicos, dependendo das dimensões e carregamento do alimentador.

O método proposto permite que mais objetivos sejam inseridos como, por exemplo: compensação reativa, transitórios de chaveamento e alocação ótima de equipamentos de proteção.

Referências Bibliográficas

- Cris, M., Salama M.M.A., Jayaram, S. "Capacitor Placement in Distribution Systems Using Heuristic Search Strategies" IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, UK, vol. 144, pp. 225-230, Feb. 1997.
- Das, D., Kothari, D.P., and Kalam, A. "Simple and Efficient Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks," Electrical Power & Energy Systems, vol. 17, pp. 335-346, May 1995.
- IEEE Standard C57.15-1999. "IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage Regulators". Recognized as an American National Standard (ANSI). Approved 16 September 1999 IEEE-SA Standards Board. ISBN 0-7381-1834-6 SS94799. 1999.
- Liang, R.H., & Wang. Y.S., "Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 18, n. 2, p. 610-618, 2003.
- Milošević, B., Begović, M. "Capacitor Placement for Conservative Voltage Reduction on Distribution Feeders". IEEE Transactions on Power Delivery, vol 19, Nº 3, pp. 1360-1367, July (2004).
- Miranda, V., Moreira, A., Pereira, J. "An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/var Control". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 22. pp. 2013-2020. Nov. 2007.
- Pamplona, F. M. P., Souza, B. A. "Algoritmos genéticos aplicados ao projeto de filtros harmônicos passivos em sistemas elétricos de distribuição", Anais do V SBQEE, Aracaju, Brasil, 1: 79-84, 2003.
- Souza, B.A., & Almeida, A.M.F. "Multiobjective Optimization and Fuzzy Logic Applied to Planning of volt/var problem in Distributions Systems". IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, n° 3, pp. 1274-1281, August 2010.
- Tien-Ting Chang and Hong-Chan Chang. "Application of Differential Evolution to Passive Harmonic Filter Planning", Proceedings of the 8th ICHQP, Athens, Greece, pp. 149-153, 1998.
- Tostes, M. E., Bezerra, U. H., Garcez, J. N., Tupiassu, A. A., Sena, A. C. A. "Development of Experimental Models for harmonic Representation of Low Voltage Customers", IEEE Power Tech Proceedings, Portugal, 2001.
- Zitzler, A., Laumanns, M., Thiele, L., "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization." In: Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control, Barcelona, Spain (2002) 19-26.